

土壤镉污染对 4 种北方阔叶树根系生理生化指标的影响

曹玲¹, 王庆成² (1. 河南科技大学林业职业学院, 河南洛阳 471002; 2. 东北林业大学, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要 [目的]研究镉污染对 4 种植物根系生理生化指标的影响。[方法]采用盆栽方法研究了不同浓度镉处理对白牛槭、刺玫果、金银忍冬和东北山梅花 4 树种根系生理生化指标的影响。一个生长季结束后收获苗木,测定各项指标。[结果]随着土壤中镉处理浓度的增大,4 树种新根生物量、根系活力、SOD 活性均逐渐降低,MDA 含量逐渐上升,4 树种的变化幅度不同。[结论]刺玫果和东北山梅花的抗镉污染能力优于白牛槭和金银忍冬。

关键词 镉;生理生化指标;白牛槭;刺玫果;金银忍冬;东北山梅花

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)05-02114-03

Effects of Soil Cadmium Contamination on the Root Physiological and Biochemical Indexes in the Seedlings of Four Tree Species

CAO Ling et al (The Forestry Vocational College, Science and Technology University of Henan, Luoyang, Henan 471002)

Abstract [Objective]The effects of cadmium contamination on the root physiological and biochemical indexes in four tree species were studied. [Method]The effect of soil cadmium contamination on the root physiological and biochemical indexes in the seedlings of four tree species such as *Rosa davurica* Pall., *Philadelphus schrenkii* Rupr., *Acer mandshuricum* Max. and *Lonicera maackii* Maxim. was studied by pot growing one-year-old seedlings. Measurement of the parameters was made after growing in one season. [Result]New root biomass, root activity and the activity of superoxide dismutase (SOD) of four tree species seedlings declined with enhanced the Cd content in soil, nevertheless the malondialdehyde (MDA) content was increased. The variation range of four tree species seedlings was different. [Conclusion]The tolerance of the *Rosa davurica* Pall. and *Philadelphus schrenkii* Rupr. to soil Cd contamination was superior to the ability of the *Lonicera maackii* Maxim. and *Acer mandshuricum* Max. on soil Cd contamination.

Key words Cadmium; Physiological and biochemical indexes; *Acer mandshuricum* Max.; *Rosa davurica* Pall.; *Lonicera maackii* Maxim.; *Philadelphus schrenkii* Rupr.

环境重金属污染中,镉因其在土壤中的高度移动性和对植物造成严重危害,被视为是最具危害性的重金属元素之一。大量的镉通过工业排污进入到土壤-植物生态系统中,使得某些地区镉的积累达到阻碍植物生长的程度,并通过食物链危及人体健康^[1-4]。目前有关镉对植物影响的研究多集中在镉对植物地上部分的影响方面,如抑制植物光合作用和蒸腾作用,干扰植物的代谢进程,降低植物产品的产量和质量,加速植物衰老等^[5-9],但对根系生态效应研究报道不多。根系是植物与土壤环境直接接触的重要界面,其对土壤环境更为敏感,土壤中镉对植物的危害首先会表现在根系的变化上^[8-9]。

白牛槭(*Acer mandshuricum* Max.)、刺玫果(*Rosa davurica* Pall.)、金银忍冬(*Lonicera maackii* Maxim.)和东北山梅花(*Philadelphus schrenkii* Rupr.)是东北东部山地的乡土树种,具有较高的美学价值和绿化潜力^[10]。要在城市环境中科学、合理地利用这些树种,必须充分考察其对各种城市环境污染物的抗性。为了探讨镉胁迫对植物根系的生态效应,该研究以白牛槭、刺玫果、金银忍冬和东北山梅花 4 种树种为试验材料,采用盆栽方法,研究了不同镉浓度对 4 种树种根系生长发育状况、根系活力、根系中 SOD 活性等方面的影响,旨在评价东北东部山区 4 种极具绿化潜力树种对镉污染的适应性和抗性,为北方城市绿化树种的选择提供参考依据,同时也为污染生态学的研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料 栽培苗木为:白牛槭、刺玫果、金银忍冬和东北山梅花 4 种树种生长相对均匀的 1 年生实生苗。

1.2 试验方法

1.2.1 栽培方法 该试验在黑龙江省哈尔滨市自然资源所苗圃进行,栽培基质为黑土和河沙的混合物。4 月中旬将土壤和河沙风干,过 5 mm 筛,按 3:1 比例充分混合。按比例将 Cd(Cl)₂·2.5H₂O 的水溶液喷施到土壤中,制成镉含量(以每 kg 风干土中纯镉 mg 数计)分别为:0(CK)、50、100 和 200 mg/kg 的土壤,记为处理①、②、③、④。待添加镉溶液的土壤风干后,充分混匀,装入塑料桶中备用。塑料桶的规格为上口径 30 cm、下口径 23 cm、桶高 25 cm。每桶中装入风干土 10 kg。于 4 月底苗木萌动前进行移栽,每种苗木每处理栽植 3 桶,每桶 3 株。将定植后的苗木放在塑料温室内进行培养。采用常规苗木水分管理措施,控制桶内杂草生长。一个生长季结束后进行根系生理生化指标测定。

1.2.2 测试指标

1.2.2.1 根系生物量 将根系烘干后用千分之一天平称量,单位为 g。

1.2.2.2 根系活力的测定 按 TTC 还原法进行。先配制 0.4% 的 TTC 溶液,与等量的磷酸缓冲液(0.1 mol/L, pH = 7.5)混匀。取 0.5 g 样品与混合液 10 ml 在 37 °C 下反应 1 h 后,加入 2 ml 2 mol/L 硫酸终止反应。取出样品,装入试管,加 20 ml 甲醇,于 37 °C 下水浴中暗反应 4~6 h,以甲醇为对照测提取液 OD₄₈₅ 值,单位为 TTF μg/g Fw·h^[11],3 次重复。

1.2.2.3 SOD 活性测定 取样品 0.5 g 置预冷的研钵中,加 5 ml 0.05 mol/L、pH 7.8 的磷酸缓冲液,冰浴条件下研磨成匀浆,低温离心(1 000 r/min)20 min,上清液为酶提取液,取

基金项目 国家自然科学基金(30371149);黑龙江省科技计划项目(GC01KB213)。

作者简介 曹玲(1977-),女,河南原阳人,讲师,硕士,从事城市林业和植物抗性生理方面的研究,E-mail:2002caoling@163.com。

收稿日期 2013-01-04

0.05 ml 采用氮蓝四唑(NBT)法测定 SOD 活性^[12],3 次重复。

1.2.2.4 MDA 含量测定。取样品 0.5 g 置预冷的研钵中,加 5% 的三氯乙酸(TCA)5 ml,冰浴条件下研磨成匀浆,低温离心(8 000 r/min)20 min,取上清液 2 ml 加 0.67% 硫代巴比妥酸(TBA)2 ml,混合后在沸水中加热 30 min,冷却后再离心,然后在 450、532、600 nm 处测定吸光度^[12],3 次重复。

1.3 数据处理 采用 Excel 2000 和 SPSS 11.5 进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫对 4 树种新根生物量的影响 根系生物量是反映根系生长发育状况的 1 个指标。从表 1 可以看出,不同镉

浓度处理下 4 树种新根生物量的变化情况。除东北山梅花在 50 mg/kg 镉处理时新根生物量高于对照外,所有树种新根生物量均随着镉浓度的增加而下降。白牛槭和金银忍冬新根生物量在低浓度镉处理时出现显著下降,刺玫果在中等浓度和最高浓度时显著下降($P < 0.05$)。东北山梅花新根生物量在 200 mg/kg 镉处理时显著下降。新根生物量的降低,说明镉对根系直接产生毒害作用,抑制根系生长,导致根系生物量下降。另外,镉干扰根的细胞分裂^[13],抑制根系生长发育,从而使根系生物量下降。根系生长发育受阻,相应地会影响根系的生理生化活动^[8]。

表 1 镉污染对 4 种苗木新根生物量的影响

处理	白牛槭		金银忍冬		东北山梅花		刺玫果	
	生物量	处理/对照	生物量	处理/对照	生物量	处理/对照	生物量	处理/对照
	g	%	g	%	g	%	g	%
①	1.97(0.35)a	100.00	1.88(0.25)a	100.00	2.56(0.38)a	100.00	4.65(0.34)a	100.00
②	0.71(0.16)b	36.04	1.15(0.24)b	61.17	3.19(0.48)a	124.61	4.10(0.52)a	88.17
③	0.41(0.07)b	20.81	0.88(0.15)b	46.81	2.02(0.30)ab	78.91	2.87(0.46)b	61.72
④	0.28(0.04)b	14.21	0.40(0.10)c	21.28	1.48(0.27)b	57.81	2.48(0.27)b	53.33

注:生物量为当年生新根的生物量;括号内为标准误差;同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$,下同)。

2.2 镉胁迫对 4 树种根系生理指标的影响

2.2.1 对根系活力的影响。根系活力与根系生命活动的强弱有直接的关系,是植物生长的重要的生理指标之一。从表 2 可知,根系活力与镉的浓度密切相关,镉的浓度越高,根系活力越低(50 mg/kg 镉处理下,刺玫果除外),说明镉降低了根系活力。根系活力的降低,可能与镉对根系的直接毒害作

用有关。试验结果表明,在 200 mg/kg 镉处理下,4 树种根系活力的降幅存在较明显的差异。其中刺玫果和东北山梅花的降幅较小,与对照相比分别下降了 10.14% 和 13.13%,金银忍冬和白牛槭的降幅相对较大,与对照相比分别下降了 25.59% 和 40.54%。说明刺玫果和东北山梅花抗镉污染能力强于金银忍冬和白牛槭。

表 2 镉污染对 4 种苗木根系活力的影响

处理	白牛槭		金银忍冬		东北山梅花		刺玫果	
	根系活力	处理/对照	根系活力	处理/对照	根系活力	处理/对照	根系活力	处理/对照
	TTF $\mu\text{g/gFw} \cdot \text{h}$	%						
①	154.17(2.50)a	100.00	140.00(1.67)a	100.00	305.00(5.00)a	100.00	345.00(3.33)a	100.00
②	139.17(5.83)b	90.27	134.17(2.50)a	95.84	294.17(2.50)a	96.45	354.17(9.17)a	102.66
③	119.17(2.50)c	77.30	118.33(3.33)b	84.52	268.33(1.67)b	87.98	342.50(2.50)a	99.28
④	91.67(3.33)d	59.46	104.17(2.50)c	74.41	265.00(3.33)b	86.87	310.00(3.33)b	89.86

2.2.2 对根系中丙二醛(MDA)含量的影响。膜质过氧化物(MDA)因镉胁迫在 4 种苗木体内积累。由表 3 可知,在不同浓度镉作用下,4 种苗木新根系中 MDA 含量、积累量都随着镉浓度的增高而显著升高($P < 0.05$),尤其是高浓度镉(200 mg/kg)胁迫下,MDA 积累量更多。与对照相比,白牛

槭、金银忍冬、东北山梅花和刺玫果在镉浓度为 200 mg/kg 时,MDA 含量与对照相比分别上升了 78.70%、74.98%、45.43% 和 27.80%。试验结果进一步表明了刺玫果和东北山梅花的抗镉胁迫能力大于白牛槭和金银忍冬。

表 3 镉污染对 4 种苗木根系中 MDA 含量的影响

处理	白牛槭		金银忍冬		东北山梅花		刺玫果	
	MDA 含量	处理/对照	MDA 含量	处理/对照	MDA 含量	处理/对照	MDA 含量	处理/对照
	nmol/g	%	nmol/g	%	nmol/g	%	nmol/g	%
①	2.30(0.02)a	100.00	21.66(0.15)a	100.00	3.94(0.12)a	100.00	2.77(0.02)a	100.00
②	2.57(0.37)a	111.74	23.66(0.90)b	109.23	4.11(0.04)a	104.31	3.22(0.05)b	116.25
③	3.64(0.03)b	158.20	34.57(0.35)c	159.60	5.33(0.08)b	135.28	3.26(0.07)b	117.69
④	4.11(0.06)b	178.70	37.90(0.09)d	174.98	5.73(0.11)c	145.43	3.54(0.01)c	127.80

2.2.3 对根系中 SOD 活性的影响。从表 4 可以看出,4 树

种根系 SOD 酶活性随着镉浓度的变化而变化。镉胁迫下,

金银忍冬根系 SOD 值在 50 mg/kg 镉处理时达到最大值, 比对照高出了 11.3%, 而后迅速下降, 在 100、200 mg/kg 镉处理时与对照相比分别下降了 6.94%、12.62%。白牛槭、东北山梅花和刺玫果根系的 SOD 活性随着土壤中镉浓度的增加持续下降, 在最大处理浓度(200 mg/kg) 时与对照相比分别降

低了 18.69%、11.24% 和 8.3%, 且种间差异显著 ($P < 0.05$)。其中白牛槭和金银忍冬的下降幅度大于东北山梅花和刺玫果, 说明了刺玫果和东北山梅花的抗镉污染胁迫能力大于白牛槭和金银忍冬。

表 4 镉污染对 4 种苗木根系中 SOD 活性的影响

处理	白牛槭		金银忍冬		东北山梅花		刺玫果	
	SOD 活性	处理/对照	SOD 活性	处理/对照	SOD 活性	处理/对照	SOD 活性	处理/对照
	U/gFw	%	U/gFw	%	U/gFw	%	U/gFw	%
①	766.86(5.52)a	100.00	471.73(4.46)a	100.00	622.02(2.98)a	100.00	824.40(14.68)a	100.00
②	712.30(7.75)b	92.89	558.04(4.46)b	118.30	607.14(5.95)a	97.61	779.76(2.98)b	94.59
③	627.98(14.88)c	81.89	438.99(4.46)c	93.06	572.92(13.39)b	92.11	758.93(5.95)b	92.06
④	623.51(10.42)c	81.31	412.20(1.49)d	87.38	552.08(1.49)b	88.76	755.95(2.98)b	91.70

3 结论讨论

(1) 根系生物量、根系活力均是反映植物根系生长发育状况的指标。试验表明, 镉对 4 种苗木新根生物量、根系活力均有影响, 且有一定的剂量效应, 表现为随镉浓度的升高, 根系生物量(50 mg/kg 镉处理下, 东北山梅花除外)、根系活力(50 mg/kg 镉处理下, 刺玫果除外)降低。因而, 镉对 4 种苗木根系发育状况有一定的影响。段昌群等^[14]认为小剂量的重金属处理, 可以提高或加速植物的某些生理生化反应。该试验中, 东北山梅花和刺玫果根系生长发育过程对镉就有这样的效应, 而大剂量的重金属作用, 则对植物表现出强烈的毒性。低镉浓度作用下, 根系产生一种应激反应, 生长发育增强, 当根系的生长介质中存在过多的镉时, 就会对根系直接产生毒害作用, 从而可能降低根系活力。

(2) 丙二醛(MDA)是植物组织在逆境下遭受氧化胁迫发生膜脂过氧化作用的产物, 其浓度的升高标志着脂质已经发生了过氧化作用, 因而 MDA 含量可以作为植物膜脂过氧化反应的强弱指标^[15]。在该试验中, 随着镉处理浓度的增加, 4 种苗木根系组织中的 MDA 含量逐渐增加, 这说明镉处理导致了脂质过氧化而使其膜的完整性受到了破坏。由此推测, 镉处理抑制 4 种苗木生长的原因可能是: 一方面镉阻碍了根系的生长而影响了根对养料的吸收, 另一方面镉破坏了膜的完整性而使胞内的有用物质大量外渗。

(3) SOD 是生物体内的重要保护酶之一, 它与 POD、CAT 等协同作用构成生物体内的保护酶系统, 以清除在逆境条件下氧自由基的积累对生物膜的破坏^[16-17]。在镉低浓度时, 金银忍冬的 SOD 活性增加, 表现出金银忍冬对低浓度镉毒害的抵抗作用。但随着镉浓度的增加, 4 种苗木根系中的 SOD 活性迅速下降, 其对镉毒害的抵御作用减弱, 膜脂过氧化水平上升, 细胞受到伤害。郭秀璞等^[18]在研究镉对小麦幼苗毒害时发现, 随着镉浓度增加保护酶活性增强, 其差异与杨居荣^[9]得出的小麦耐镉性大于玉米的结论是一致的。Hendny 等^[20]提出, 镉对植物的毒害是由于镉诱发高活性的自由基, 而自由基是导致膜脂过氧化的主要原因。生物体内的保护酶系统具有清除自由基的作用, 如果保护酶活性较强, 就能减少自由基等毒害物质的积累, 膜脂过氧化水平就

稳定^[21]。反之, 如果保护酶活性下降, 自由基大量积累, 就会加剧细胞膜的损伤。因此, 在镉胁迫下, 自由基产生, 保护酶活性下降, MDA 含量增加, 从而抑制苗木的生长发育。

(4) 该试验中, 在不同镉处理浓度下, 刺玫果和东北山梅花的几项指标变化幅度均低于金银忍冬和白牛槭。从城市绿化应用方面来看, 刺玫果和东北山梅花较金银忍冬和白牛槭更适合于在镉污染严重区栽培。

参考文献

- [1] ANDRES SCHÜTZENDÜBEL, PETER SCHWANZ, THOMAS TEICHMANN, et al. Cadmium - Induced changes in antioxidative systems, hydrogen peroxide content, and differentiation in Scots pine roots[J]. Plant physiology, 2001, 127:887 - 898.
- [2] SANITA DI TOPPI K, GABBRIELLI R. Response to cadmium in higher plants[J]. Environment Exp Bot, 1999, 41:105 - 130.
- [3] KAHLE H. Response of roots of trees to heavy metals[J]. Environment Exp Bot, 1993, 33:99 - 119.
- [4] 杨居荣, 何建群, 张国祥, 等. 不同耐性作物中几种酶活性对 Cd 胁迫的反应[J]. 中国环境科学, 1996, 16(2):113 - 117.
- [5] BAZZAZ F A, ROLFE G L, CARLSON R W. The effect of cadmium on photosynthesis and transpiration of excised leaves of corn and sunflower[J]. Physiol Plant, 1974, 34:373 - 377.
- [6] LEE K C, CUNNINGHAM B A, PAULSEN G M, et al. Effect of cadmium on respiration rate and activities of several enzymes in soybean seedlings[J]. Physiol Plant, 1976, 36:1 - 6.
- [7] LAKSHAMN K C, VIRINDER K G, SURINDER K S. Effect of cadmium on enzyme of nitrogen metabolism in pea seedling[J]. Phytochemistry, 1992, 31(2):395 - 400.
- [8] 秦天才, 吴玉树, 王焕校, 等. 镉铅及其相互作用对小白菜根系生理生态效应的研究[J]. 生态学报, 1998, 18(3):320 - 325.
- [9] 张玲, 李俊梅, 王焕校. 镉胁迫下小麦根系的生理生态变化[J]. 土壤通报, 2002, 33(1):61 - 65.
- [10] 周以良, 董世林, 聂绍荃, 等. 黑龙江树木志[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社, 1986.
- [11] 袁晓华, 杨中汉. 植物生理生化实验[M]. 北京:高等教育出版社, 1983:128 - 133.
- [12] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- [13] MUKHERJI S, MAITRA P. Toxic effects of lead on growth and metabolism of germinating rice (*Oryza sativa* L.) seeds and mitosis of onion (*Allium cepa* L.) [J]. India J Exp Bio, 1976, 14:519 - 521.
- [14] 段昌群, 王焕校, 曲仲湘. 重金属对蚕豆根尖的核酸含量及核酸酶活性影响的研究[J]. 环境科学, 1992, 13(5):31 - 35.
- [15] 秦天才, 阮捷, 王腊娇. 镉对植物光合作用的影响[J]. 环境科学与技术, 2000(1):33 - 44.
- [16] 王爱国, 罗广华. 几种检测超氧化物歧化酶活性反应的比较[J]. 植物生理学通讯, 1983(5):46 - 49.

$$X = \frac{M_1 - M_2}{M} \times 100\%$$

式中: X 为干果含油率(%); M 为样品质量(g); M_1 为油 + 抽提底瓶 + 沸石质量(g); M_2 为抽提底瓶 + 沸石质量(g)。

1.3.4 数据统计分析。数据采用 Excel 和 Spss 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 果实和果核特征指数 8 个油橄榄品种的果实特征指数见表 2, 果核特征指数见表 3。

从表 2 可以看出:测定的 8 个油橄榄品种,在果实质量、横径、纵径方面存在着明显的差异。从变异系数中可以看到,果实质量变异系数最大,达到 40.79%;果实质量最大的是小苹果(7.15 g),果实质量最小的是云杂 2 号(1.30 g)。果形指数变异系数最小,为 8.36%。从表 3 可以看出,不同品种的果肉率中,果肉率最高的是小苹果,高达 91.00%,果肉率最低的是云杂 2 号,果肉率为 68.98%。

表 2 8 个油橄榄品种的果实特征

品种编号	纵径//cm	横径//cm	质量//g	果形指数
①	2.51	2.24	7.15	1.12
②	2.68	2.03	6.51	1.32
③	2.69	2.03	6.86	1.33
④	1.51	1.12	1.30	1.34
⑤	1.82	1.61	2.90	1.13
⑥	2.45	1.75	4.64	1.40
⑦	2.67	2.07	6.06	1.29
⑧	2.30	1.94	4.98	1.18
变异系数	18.84%	19.11%	40.79%	8.36%

表 3 8 个油橄榄品种的果核特征

品种编号	纵径//cm	横径//cm	质量//g	果肉率//%
①	1.41	0.85	0.64	91.00
②	1.88	0.90	0.99	84.87
③	1.90	0.88	0.98	81.84
④	1.22	0.70	0.40	68.98
⑤	1.10	0.70	0.38	86.90
⑥	1.69	0.80	0.72	84.50
⑦	1.65	0.74	0.62	89.79
⑧	1.37	0.89	0.68	86.52

2.2 果实含水率和含油率 8 个油橄榄品种的果实含水率、干果含油率、鲜果含油率结果见表 4。

从表 4 中可以看出,干果含油率最高的是佛奥(45.40%),

其次是科拉蒂(44.81%)和鄂植 8 号(44.79%),干果含油率最低的是云杂 2 号(33.51%)。果实含水率最高的是小苹果(68.34%),其次是皮瓜尔(67.52%),含水率最低的是佛奥(49.85%)。鲜果含油率最高的是佛奥(22.77%),其次为米提尼(18.79%)和科拉蒂(18.70%),最低的为小苹果(12.08%)。

综合 8 个油橄榄品种的果实纵径、果实横径、果实质量的方差分析结果表明,8 个不同品种的油橄榄在果实性状上存在着明显的差异。

表 4 8 个油橄榄品种的含水率和含油率 %

品种编号	含水率	干果含油率	鲜果含油率
①	68.34	38.17	12.08
②	59.67	44.79	18.06
③	58.27	44.81	18.70
④	50.16	33.51	16.70
⑤	64.24	40.58	14.51
⑥	49.85	45.40	22.77
⑦	67.52	43.54	14.14
⑧	58.02	44.75	18.79

3 结论

(1)8 个油橄榄品种在果实纵径、果实横径、果实质量方面存在着很大的差异。单果质量最大的是小苹果,单果质量最低的是云杂 2 号。

(2)各果实特征的变异程度由高到低顺序为:果实质量、果实横径、果实纵径、果形指数。果形指数的变异程度在 8 个品种的测定指数中最低,其受外部的环境影响较小,品种的特征值容易确定,它可以直接为油橄榄品种的形态鉴别提供参考。

(3)通过各项指标的测定,在永仁县采集的 8 个品种中,含油率较高的是佛奥、鄂植 8 号、科拉蒂和米提尼。

参考文献

- [1] 徐纬英. 中国油橄榄[M]. 长春:长春出版社,2011.
- [2] 李俊霞,黄易,徐晓巍,等. 我国及世界油橄榄产业分析[J]. 消费导刊, 2010(1):43-44.
- [3] 邹天福. 油橄榄发展趋势及其对策建议[J]. 甘肃林业,2012(2):34-35.
- [4] 陆斌,杨卫明,张植中,等. 云南油橄榄引种四十年[J]. 西部林业科学, 2005,34(1):62-65,69.
- [5] 宁德鲁,陆斌,杜春华,等. 云南省油橄榄适宜栽培区的划分[J]. 林业科技开发,2008,22(5):39-41.

(上接第 2116 页)

- [17] 王晨阳,马元喜,周苏玫,等. 土壤渍水对冬小麦根系活性氧代谢及生理活性的影响[J]. 作物学报,1996,22(6):712-719.
- [18] 郭秀璞,孔祥生,张妙霞,等. 锌对小麦幼苗镉胁迫缓解效应的研究[J]. 华北农学报,1998,13(S1):50-55.
- [19] 杨居荣. 农作物 Cd²⁺ 耐性的种内和种间差异 I. 种间差[J]. 应用生态学报,1994,5(2):192-196.
- [20] HENDNY G A F,BAKER A J M,WART C F E. Cadmium tolerance and toxicity. Oxygen radical processes and molecular damage in cadmium -

tolerant and cadmium - sensitive of *Holcus lanatus* L[J]. Acta Bot Neerl,1992,41:271-281.

- [21] 王宝山. 生物自由基与植物膜伤害[J]. 植物生理学通讯,1988(2):12-14.
- [22] 邹金华,张志贵,蒋悟生,等. 城市行道树大叶黄杨和月季铅镉污染现状及其评价[J]. 安徽农业科学,2012(35):17240-17243,17290.
- [23] 刘声传,罗显扬,赵志清,等. 茶树对铅、镉、铜的吸收累积特性研究[J]. 西南农业学报,2011(5):1805-1812.